

ВИКОРИСТАННЯ ЛАЗЕРНОГО МАГНІТОМЕТРА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

О. А. Корж^{1, а}

¹ Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
Фізико-технічний інститут

Анотація

Магнітні вимірювання активності нейронів дають цінну інформацію про функції мозку, дозволяючи ідентифікувати джерела та характеризувати динаміку нейронної системи. Раніше ця система була записана з низьким просторовим розрізненням в масштабах всього мозку. В основі нової технології, що набуває зараз популярності, лежать надчутливі атомні магнітometri, які дозволяють досліджувати дуже малі нейронні мережі.

В огляді надаються відомості про будову нових надчутливих атомних магнітометрів, їх основні характеристики та доцільність їх використання для дослідження нейронних мереж. Також особливу увагу приділено перспективам використання таких досліджень в подальшому.

Ключові слова: атомний магнітометр, нейронна мережа

Вступ

В останній час атомні магнітometri викликають значне зацікавлення у зв'язку з перспективами високої чутливості і розрізнення нейронного магнітного поля. Отримання зображень мікроскопічного магнітного поля на рівні декількох нейронів є новим і потенційно революційним напрямком для функціональної нейровізуалізації. Моделі нейронних мереж покращають наше розуміння генезису магнітоенцефалографії і можуть стати поштовхом для покращення інших методів, заснованих на магнітних вимірюваннях, таких як візуалізація нейронного струму за допомогою МРТ.

Картування магнітного поля надає пряму інформацію про функціонально значимі процеси у нейронах, потенційно з більшою точністю і розрізненням, ніж інші методи. Багаторівневе моделювання динамічних нейронних мереж має важливе значення для розуміння роботи людського мозку. Таке моделювання може заповнити порожнини в початково обмежених експериментальних даних, що дозволить нам покращити припущення. Моделювання великомасштабних нейронних мереж, що в наш час засновується на спрощених моделях нейронів, буде поєднуватися з анатомічно реалістичними підрахунками магнітного поля для прогнозування магнітних полів систем нейронів в різних масштабах.

Загалом вимірювання і моделювання динамічної схеми мозку має важливе значення для розуміння людської свідомості. Однак моделі мають бути перевірені експериментально. В цій статті описані деякі з найчутливіших у світі методів магнітної візуалізації

для перевірки моделей обчислювальної нейробіології в широкому діапазоні масштабів довжини і часу.

1. Будова атомного магнітометра

Лужно-металічні атомні магнітometri є одними з найбільш чутливих приладів для виявлення та характеристики магнітних полів.

Вони складаються зі скляної комірки, що містить випарувані лужні метали (такі як рубідій чи цезій), які оптично накачуються за допомогою використання резонансного лазерного променя (Pump Beam), що дає поляризацію порядку одиниці. Стан поляризації атомів також досліджується за допомогою лазера (Probe Beam), щоб виміряти їх частоту магнітного резонансу, яка, в свою чергу, прямо пропорційна напруженості локального магнітного поля.

Основний принцип атомної магнітометрії показаний на Рис. 1. Ми вимірюємо частоту прецесії Лармора¹ спінів атомів в магнітному полі B , враховуючи, що:

$$\omega = \gamma * B \quad (1)$$

де гіромагнітне співвідношення γ слугує коефіцієнтом перетворення між частотою і напруженістю магнітного поля.

Зазвичай для магнітометрії використовуються пари атомів лужних металів, оскільки кожен з них має лише один валентний електрон, тому атомний spin задається векторною сумою спінів ядра і валентного електрона.

¹ Ларморівська прецесія - це зміна/обертання магнітного моменту електронів, атомного ядра і атомів навколо вектора зовнішнього магнітного поля.

^аolgakorzh1998@gmail.com

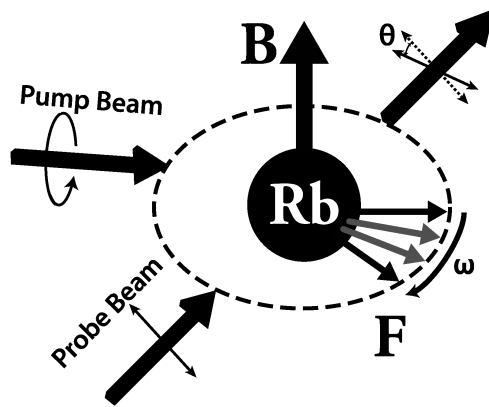


Рис. 1. Принцип роботи атомного магнітометра

Лужний метал знаходиться в скляній комірці, яка нагрівається, щоб збільшити густину насичених парів атомів.

Спіни лугу деполаризуються одразу після зіткнення зі скляними стінками парової комірки, тому необхідно запобігти цим зіткненням. Існує два методи, для вирішення цієї проблеми:

- 1) Заповнення комірки високим тиском інертного буферного газу для запобігання дифузії, що дає перевагу в тому, що атоми в різних частинах комірки поведуться як незалежні магнітометри, що дозволяють вимірювати градієнти магнітного поля.
- 2) Нанесення на поверхню хімічної речовини, що запобігає деполаризації. Найбільш ефективним з відомих є парафінове покриття. Покриті комірки мають переваги в тому, що зменшується вплив градієнтів магнітного поля на час життя спінової поляризації, а також знижуються вимоги до потужності лазерів.

[1, 2]

1.1. Чутливість магнітометра

Магнітометри зазвичай характеризуються чутливістю, яка визначає точність приладу; ми можемо думати про це, як про найменшу зміну рівня поля, яку датчик здатний розрізнити, або як розмір найменшого поля, який він може визначити.

На фундаментальному рівні, магнітометр фактично вимірює розщеплення енергій між Зеємановськими підрівнями² основного атомного стану за рахунок магнітного поля. Ширина ліній такого спектроскопічного вимірювання дається часом життя когерентності T_2 атомних спінів:

$$\Delta B = \frac{\Delta \omega}{\gamma} = \frac{1}{\gamma T_2} \quad (2)$$

Звідси випливає, що будова чутливого магнітометра залежить від досягнення максимально можливо го часу життя поляризації.

²Ефект Зеємана - квантовий ефект, за допомогою якого магнітний спін в атомі розщеплюється в присутності зовнішнього магнітного поля.

З феноменологічної точки зору, чутливість магнітометра залежить від співвідношення сигналу до шуму $\frac{S}{N}$ сигналу Зеєманівського резонансу, а також ширини лінії:

$$\delta B = \frac{\Delta B}{\left(\frac{S}{N}\right)} \quad (3)$$

Таким чином, шум магнітного поля має бути по можливості послабленим, і варто переконатися, що система оптичного детектування стабільна. Діодні лазери легко налаштовуються і можуть бути дуже стабільними, що дозволяє проводити дуже скромні вимірювання оптичного обертання. Можна посилити резонансний сигнал, збільшивши кількість атомів в спіновому ансамблі, або шляхом використання великої парової камери.

[1]

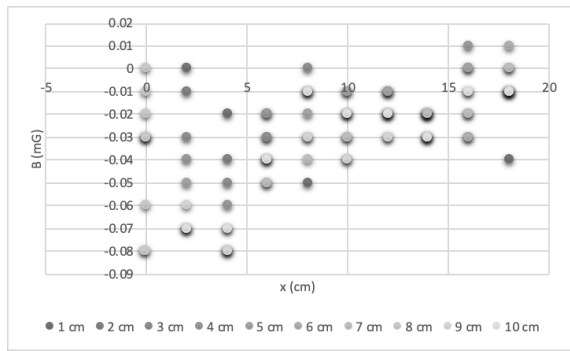
1.2. Точність магнітометра

Іншою важливою характеристикою магнітометра є його точність. Атомні магнітометри, що працюють в магнітному полі Землі, виявляють похибки курсу або зсуву виміряної резонансної частоти в залежності від орієнтації датчика відносно поля. Для того, щоб пригнічити похибку курсу, можна одночасно збуджувати як лінійний (ларморовський), так і квадратичний магнітний резонанс. Тоді похибка зменшиться до 0.1 нТл, а чутливість магнітометра значно покращиться. [1]

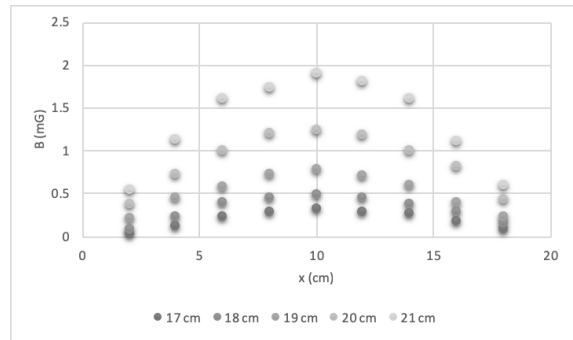
2. Експеримент

В якості прикладу в даному дослідженні розглянуто магнітометр QZFM-00GE від компанії QuSpin. Це надчутливий векторний магнітометр, що може працювати в умовах слабкого поля. Він являється одним з найчутливіших детекторів, з характеристиками, що конкурують з надпровідниковими технологіями. Сенсорна головка працює при кімнатній температурі і повністю інтегрує лазер з іншими компонентами, усуваючи складності зі сторони волоконної оптики чи криогенної техніки. Також цей магнітометр самокалібрується і може одночасно вимірювати компоненти поля по двох осях Y та Z.

Сам магнітометр розташовується в захисному циліндрі, який виготовлений з μ -металу для зменшення впливу магнітного поля зовнішнього середовища. На одній з основ циліндра розташований екран діаметром 2.5 см для проведення необхідних маніпуляцій всередині. Для більш детальної характеристики роботи магнітометра та розуміння в якій області даного циліндру краще проводити вимірювання магнітного поля нейронів (яке є дуже малим) для отримання точних результатів, було виконано картування магнітних полів всередині циліндра. Результати представлено на Рис.2. Як можна помітити, в глибині циліндру вплив зовнішніх магнітних полів майже відсутній, що дозволяє отримувати досить точні результати при вимірюванні малих полів порядку 0.01мГс, тоді як при наближенні до екрану вплив зростає і



(а) В глибині циліндра



(б) Біля екрану циліндра

Рис. 2. Графіки залежності магнітного поля від розташування магнітометра всередині циліндра

може давати помилку порядку 2мГс, що може бути суттєвим при вимірюванні нейронних відгуків.

3. Доцільність використання атомних магнітометрів

Переваги:

- Атомний магнітометр зберігає свою чутливість навіть на дуже низьких частотах, на відміну від індуктивних детекторів, які зазвичай використовуються в ЯМР, чия чутливість погіршується на більш низьких частотах;
- Атомні магнітометри мають високу роздільну здатність і не потребують криогенного апарату;
- Також саме завдяки атомним магнетометрам можна проводити неінвазивні дослідження нейронних мереж та мозку, отримуючі досить точні результати.

Потенційних недоліків у атомних магнітометрів два:

- 1) Атомний магнітометр може працювати лише поблизу нульового поля, що потребує створення додаткової доволі громіздкої системи;
- 2) Датчик парової комірки має бути нагрітим, а це потребує часу та додаткової конструкції.

4. Подальші перспективи дослідження

Данне дослідження в подальшому може мати дуже вагомий внесок в розвиток декількох напрямків:

- 1) Дослідження роботи нейронної мережі в сітківці ока допоможе краще зрозуміти механізм зору людини. Це в свою чергу може допомогти в лікуванні багатьох хвороб, а також в розробці очних протезів для незрячих людей.
- 2) Використання атомних магнітометрів є потенційно дуже зручним. Зважаючи на вищеперераховані переваги, атомні магнітометри можуть

стати радикально новим і якісним приладом для дослідження людського мозку, зокрема замінивши вже відомі апарати МРТ.

- 3) Дане дослідження стане поштовхом до кращого розуміння роботи нейронних мереж, що потенційно може стати корисним на шляху до створення штучного інтелекту та нейронних комп'ютерів.

Висновки

В данній статті було розглянуто будову та основні принципи роботи атомних магнітометрів, описано їх точність та чутливість та що на них впливає. Також було розглянуто доцільність використання атомних магнітометрів для дослідження нейронних мереж.

З усього вищезазначеного можна зробити висновки, що атомні магнітометри є революційно новою технологією для дослідження нейронних мереж дуже малих розмірів. Також варто зазначити, що метод роботи з такими чутливими приладами дозволяє отримувати дуже точні результати в порівнянні з раніше використовуваними технологіями. Недоліки магнітометрів повністю перекриваються їх перевагами, а зазначені вище перспективи подальшого розвитку є вагомим аргументом для проведення досліджень з лазерними магнітометрами.

Перелік використаних джерел

1. Scott Jeffrey Seltzer. *Developments in Alkali-Metal Atomic Magnetometry*. PhD thesis, 2008.
2. Ki Young Kim and Igor Savukov. *Advances in Optical and Photonic Devices*, chapter Ultra-Sensitive Optical Atomic Magnetometers and Their Applications. InTech, 2010.